DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-215-225 УДК 621.039.553.5

РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ В ПОРТУ САБЕТТА НА ПЛАВУЧИХ АТОМНЫХ ОБЪЕКТАХ ФГУП «АТОМФЛОТ»

С. В. Антипов, В. Л. Высоцкий, Д. А. Припачкин, К. Г. Рубинштейн, Р. Ю. Игнатов. И. М. Губенко. И. Н. Хохлов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2024 г.

Для цитирования

Антипов С. В., Высоцкий В. Л., Припачкин Д. А. и др. Радиационные и радиологические последствия гипотетических ядерных аварий в порту Сабетта на плавучих атомных объектах ФГУП «Атомфлот» // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. 215—225. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-215-225.

Представлены результаты моделирования и прогноза распространения техногенных радионуклидов в приземном слое атмосферы в результате возникновения гипотетической ядерной аварии на плавучих объектах с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) ФГУП «Атомфлот» при их заходе и нахождении в порту Сабетта в интересах обеспечения безопасности населения и окружающей среды. Путем сопоставления полученных численных оценок с допустимыми уровнями радиоактивного загрязнения окружающей среды для населения дана оценка угроз и потенциальной опасности, которую могут представлять отдельные типы судов с ЯЭУ.

Ключевые слова: *гипотетическая ядерная авария, ядерная энергетическая установка, техногенные радионуклиды, плотность радиоактивного загрязнения, дозовая нагрузка.*

Введение

В соответствии с «Морской доктриной Российской Федерации» происходит интенсивное развитие Северного морского пути (СМП) как важнейшего элемента Арктической зоны, конкурентоспособной на мировом рынке транснациональной коммуникационной системы. В этой связи к долгосрочной государственной задаче относится строительство атомного ледокольного флота с повышенным уровнем технической и радиационной безопасности. Применение современных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) обеспечит ему мобильность, маневренность и неограниченную автономность, что необходимо при работе в круглогодичном режиме в арктическом регионе.

Особую роль при этом играет Карское море, на которое замыкаются крупнейшие экономически развивающиеся сибирские бассейны Оби и Енисея. В планы Правительства и Министерства транспорта России входят освоение этого региона как одного из ключевых месторождений нефти и газа, а также создание центров формирования современной коммуникационной инфраструктуры, включая порты.

Как показывает более чем полувековой опыт, использование атомных ледоколов в Арктике полностью оправдало себя. Однако для непрерывного обслуживания сквозных грузоперевозок между Западной Европой и Дальним Востоком возникла необходимость создания более мощных ледоколов

[©] Антипов С.В., Высоцкий В.Л., Припачкин Д.А., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Губенко И. М., Хохлов И. Н., 2025



Рис. 1. Направления прогноза переноса радионуклидов при моделировании гипотетических аварий на плавучих объектах ФГУП «Атомфлот» в порту Сабетта. Область 500±100 км — Карское море, в береговой зоне 200 км — выход из Обской губы на СМП. Область 1000 км — архипелаг Новая Земля, восточная часть Баренцева и Карского морей. Порт Сабетта, метеостанции в поселках Тамбей и Сёяха

Fig. 1. Forecast directions of radionuclide transfer when modeling hypothetical accidents on the FSUE Atomflot floating objects in the port of Sabetta. Area 500±00 km — the Kara Sea, in the coastal zone social zone, 200 km — exit from the Gulf of Ob to the NSR. Area 1000 km — the Novaya Zemlya Archipelago, eastern part of the Barents and Kara Seas. The port of Sabetta, weather stations in the villages of Tambey and Seyakha

с реакторными установками (РУ) типа РИТМ (реактор с интегрированными в корпус парогенераторами, транспортный, морской). Их строительство началось в 2020 г., спуск на воду намечен на 2027—2028 гг. Основными требованиями, предъявляемыми к новым ледоколам, являются техническая надежность и высокая радиационная безопасность не только на судне, но и в пунктах базирования, захода, а также в районах круглогодичной навигации.

В настоящее время подобные объекты базируются в Мурманске на ФГУП «Атомфлот». К новым относятся РУ типа РИТМ-200 тепловой мощностью 175—209 МВт и РИТМ-400 (315 МВт), в которых наработка ^{134,137}Сs будет достигать 50—70 ПБк [1]. Такое накопление уже сопоставимо с их образованием на АЭС «Фукусима-1», где в 2011 г. произошла ядерная авария [2]. Принято все аварии подразделять на три группы: проектные с вероятностью возникновения 10⁻³—10⁻⁴ год⁻¹ (устранимы), запроектные (не предусмотрены, но происходят) с вероятностью возникновения 10⁻⁵—10⁻⁶ год⁻¹ и гипотетические, связанные с чрезвычайно редкими событиями, с вероятностью возникновения 10-7—10-8 год-1 (не исключены). Последние рассматривают на сценарном уровне, а угрозы и опасности оценивают путем прогнозирования возможных неблагоприятных последствий [3].

Напомним, что после аварии на АЭС «Фукусима-1» по различным оценкам в атмосферу поступило 90—700 ПБк¹³¹I и 7—50 ПБк¹³⁷Cs, общий выброс радионуклидов приблизился к 10% от выброса во время аварии 1986 г. на Чернобыльской АЭС [4]. На морскую акваторию попало примерно 80% выброшенных радиоактивных веществ, которые осели на поверхность океана и были подхвачены течениями. Потребовались широкомасштабные дорогостоящие международные исследования, включая отборы проб, замеры активности ¹³¹I, ^{134,137}Cs и других радионуклидов в воздухе, почве, морской воде, грунте, фауне и флоре. Оценки показали, что их выбросы в атмосферу и сбросы в море могли составлять 10— 20 ПБк ¹³¹I и 1—6 ПБк ¹³⁷Cs. Эти данные использовались для уточнения мощности выбросов и определения масштаба загрязнения, но стало понятно, что по ограниченному количеству измерений с широкой неопределенностью значений получить удовлетворительную информацию затруднительно [5].

По этой причине пошли по пути моделирования и прогноза с последующим сопоставлением расчетных значений с результатами отдельных измерений. Модельный подход не столь затратен, но уже на ранней стации дает представление об ожидаемых угрозах и потенциальной опасности объектов с ЯЭУ.

В связи с этим для обеспечения безопасности населения и окружающей среды целью исследований стали моделирование, прогноз и оценка последствий гипотетических ядерных аварий на объектах с ЯЭУ различной тепловой мощности, относящихся к ФГУП «Атомфлот», при заходе и возможном базировании судов с ядерной РУ в порту Сабетта.

Методы исследования

Масштабы моделирования, критерии безопасности. Перенос и распространение радиоактивных веществ в пограничном слое атмосферы до 3—4 км над землей прогнозировали с использованием программного средства (ПС) ПАРРАД [6]. Расчетная область имела две зоны: дальняя (1000— 1100 км) и ближняя (200—250 км). В наибольшую входили Новая Земля, часть Баренцева моря, Карское море и Обская губа, города вблизи порта Сабетта: Норильск (640 км), Новый Уренгой (610 км) с населением 185 и 110 тыс. человек, Воркута (525 км), Салехард (573 км) — 67 и 49 тыс. человек, Дудинка (570 км), Сабетта (1—3 км) — 22 тыс. человек. Прогноз выполняли для летнего и зимнего периодов. Перенос пассивной примеси (радионуклидов) рассматривали в двух направлениях — на север (выход к СМП в Карском море) и восток (Гыданский терминал сжиженного природного газа — СПГ).

Для обеспечения моделирования и прогноза их распространения в пограничном слое атмосферы использовали архивные данные за 2020—2022 гг. метеостанций, расположенных в Обской губе в поселках Тамбей (№ 20864, 24 км) и Сёяха (№ 20967, 125 км). Они включали температуру, скорость, направление ветра, осадки и ледовую обстановку (рис. 1).

Анализ метеоданных за 2020— 2022 гг. позволил оценить:

- среднегодовую температуру, которая в основном является отрицательной, в январе-феврале достигает -22...-25°С, в теплые месяцы июль, август — до +5...+13°С;
- осадки, обусловленные арктическим климатом: холод 8 месяцев, глубина снега в среднем 20 см;
 4 месяца плюсовая температура, в июне-июле туманы и дожди до 40—42 мм;
- ледовое покрытие в Обской губе и Карском море: летом оно отсутствует, в декабре его сплоченность достигает 0,8—0,9, к февралю ослабевает до 0,6;
- ветер в северном и восточном секторах, имеющий наибольшую повторяемость 8,3% и 5,3% на метеостанции в поселке Тамбей; одновременно на двух станциях ЮВВ и ЮЮЗ ветры повторялись в пределах 10,2—11,0% и 9,3—9,6%, в остальных — 4,0—8,3%; по розе ветров повторяемость направлений С, ЮЮЗ и ЮВВ в 1,5—2 раза превосходила остальные.

Поля ветров. Для их моделирования и прогноза использовали гидродинамическую модель WRF ARW в расчетной области 4350×4350 км с шагом по горизонтали 18 км (241×241 уз), по вертикали — 39 уровней от 2 до 20 000 м. На основе глобальных данных NCAR/NCEP (GFS) по 0,25-градусной сетке формировали начальные и граничные условия, доступные для пользователей Интернета с периодичностью четыре раза в сутки (00, 06, 12 и 18 UTC) [7] и содержащие информацию, требующуюся для запуска модели WRF-ARW.



Рис. 2. Расчетная область для модели WRF-ARW, рельеф местности над уровнем моря и характеристики подстилающей поверхности (эллипс — расчетная область, треугольник — порт Сабетта, цвет отражает тип поверхности: синий — вода, желтый снег, розовый — мерзлота, коричневый — лесотундра, светло-зеленый — смешанные леса, темно-зеленый — лиственные леса)

Fig. 2. Computational domain for the WRF-ARW model, terrain relief above the sea level and characteristics of the underlying surface (ellipse – computational domain, triangle – the port of Sabetta, color indicates the surface type: blue – water, yellow – snow, pink – permafrost, brown – forest tundra, light green – mixed forests, dark green – deciduous forests)

> Расчетная область. При моделировании и прогнозе учитывались рельеф местности, типы подстилающей поверхности в порту Сабетта и прилегающем регионе. Использовали полярную версию модели WRF-ARW (v.4.4.2) [8]. Заблаговременность данных составляла 72 ч, частота выдачи — 1 ч. Для расчетной области радиусом до 2400 км построили рельеф местности и подстилающую поверхность (рис. 2).

> Критерии безопасности. При возникновении ядерной аварии в соответствии с нормативными требованиями [9—11] принятие решения о допустимости длительного пребывания населения на местности производится по следующим показателям, связанным с загрязнением подстилающей поверхности ¹³⁷Cs: более 1480 кБк/м² и более 50 мЗв/год отчуждение, 555—1480 кБк/м² и 20—50 мЗв/ год — отселение, 185—555 кБк/м² и 5—20 мЗв/ год — ограниченное проживание с правом отселения. В случае принятия решения остаться на месте (более 185 кБк/м² и 1—5 мЗв/год) жители должны быть обеспечены медицинским контролем и выполнять все мероприятия по снижению уровня облучения. При этом территория должна иметь льготный социально-экономический статус, включающий радиационный и медицинский контроль, радио

экологическую защиту, необходимые хозяйственно-экономические и экологические структуры, компенсирующие аварийную и психоэмоциональную нагрузку.

- Исходными данными для прогноза являлись:
- место гипотетической аварии порт Сабетта, направления переноса — север и восток;
- тип подстилающей поверхности: тундра, проливы, болота, озера, переходы суша-море;
- сезоны моделирования лето, зима (без осадков);
- мощность выброса ¹³⁷Сs, кратная 10, в интервале 10¹³—10¹⁷ Бк;
- длительность выброса 1 с (мгновенный);
- средняя высота подъема радиоактивного облака 70 м для данного типа объектов; определяющие дозообразующие β-, γ-, α-радионуклиды: ⁹⁰Sr, ¹³¹I, ^{134,137}Cs, ^{239,240}Pu:
- их физико-химическая форма аэрозоли, скорость сухого осаждения 0,008 м/с;
- оценивались: плотность радиоактивного выпадения, мощность эквивалентной дозы, доза;
- оценка дозовой нагрузки на население (дети, взрослые) в течение 1, 10 и 365 сут;
- поле расчетных узлов до 1000 км 2520 (шаг 18 км), до 250 км — 9126 (шаг 0,9—2 км).

Выбор ПС для прогноза. Для обоснования безопасной эксплуатации объектов использования атомной энергии, к которым относятся предприятия ядерного топливного цикла (ЯТЦ) (АЭС, радиохимические комбинаты, добывающие предприятия, а на ФГУП «Атомфлот» транспортные ядерные установки и др.), при оценках радиационного воздействия радиоактивных выбросов на человека и окружающую среду принято применять утвержденные методики [12] и аттестованные ПС. Они, как правило, базируются на моделях переноса [12—14] с использованием «средних» параметров аэрозольных частиц при фиксированных условиях их осаждения (шероховатость поверхности, скорость сухого осаждения), что оправдано для однородных подстилающих поверхностей и высотных выбросов более 500 м. При рассмотрении подъема радиоактивных веществ до 150-200 м применительно к неоднородным поверхностям такой подход недостаточно эффективен, но хорошо зарекомендовал себя предложенный в [15; 16], который был опробован при анализе последствий реальных ядерных аварий [14; 17].

Вокруг порта Сабетта местность представляет собой сочетание сложного рельефа и сильно неоднородных подстилающих поверхностей (тундра, морские акватории, редколесье и др.). Сравнительное моделирование показало, что общепринятый подход для большинства предприятий ЯТЦ с фиксированной z₀ = const (15 см, «тундра») при пересечении радиоактивным облаком Обской губы на 95—97% приводит к истощению радиоактивного облака уже вблизи источника и на ее акватории. Предложенный в [15; 16] способ для малых высот (z₀ ≠ const) с учетом водной поверхности показал, что до 20—30% радиоактивных веществ пересекут акваторию губы и смогут загрязнить сооружения, относящиеся к СПГ.

Объясняется это тем, что в [12] при фиксированных условиях осаждения аэрозолей в рассматриваемой расчетной области используют только один преобладающий тип поверхности («тундра»). Соответственно сразу возникает наибольшее загрязнение вблизи источника как более шероховатой поверхности в сравнении с акваторией. В отличие от [13; 14] в [15; 16] осаждение реализуется не только на поверхность «тундра», но и на поверхностности «тундра» и «вода», в результате последний подход стал определяющим в настоящих исследованиях.

Результаты исследований и обсуждение

Прогноз в зоне наблюдения (3H) показал, что на начальном этапе гипотетической аварии в 5 км 3H, где проживает все население города Сабетта, существенную роль играют факторы радиоактивного загрязнения приземного слоя атмосферы и вид подстилающей поверхности. Расчеты показали, что наибольшая объемная активность после взрыва возникнет не вблизи источника, а в 2—7 км, т. е. за пределами санитарно-защитной зоны (СЗЗ) (рис. 3).

По мере передвижения радиоактивного облака от места аварии его размеры за счет турбулентной диффузии возрастают, а время прохождения над каждой последующей контрольной точкой увеличивается: в 1 км — до 2—3 мин, 2 км — 4—5 мин, 3 км — 6—7 мин, 5 км — 8—9 мин, 10 км — 14—16 мин. На удалении 10 км объемная активность ¹³⁷Cs становится меньше в 5—7 раз по сравнению с областью наибольшего загрязнения воздуха в 2—7 км. Однако при выбросах 10¹⁵— 10¹⁷ Бк произойдет превышение допустимых норм в 10³—10⁸ раз по всем рассматриваемым радионуклидам, что потребует экстренной эвакуации населения (в соответствии с [9] они составляют: ¹³⁷Cs — 27 Бк/м³, ¹³⁴Cs — 19 Бк/м³, ¹³¹I — 7,3 Бк/м³, ⁹⁰Sr — 2,7 Бк/м³ и ^{239,240}Pu — 2,5·10⁻³ Бк/м³).

Соответственно увеличится плотность выпадения ¹³⁷Cs в 1 км C33 и 2—5 км 3Н. Уровни загрязнения более 1480 кБк/м² (отчуждение) и 555—1480 кБк/м² (отселение) будут преодолены выбросами 10¹⁵—10¹⁷ Бк и частично 10¹⁴ Бк. Воздействие источника 10¹³ Бк в 3Н позволит населению проживать в ней с правом на отселение, но только за пределами следа (табл. 1).

Анализ индивидуального вклада в общую плотность выпадения ост+альных дозообразующих радионуклидов в ЗН до 5 км от места аварии показал их неоднородность для различных условий проживания населения и по уровню превышения фона. По факторам интенсивного и длительного воздействия они расположены в следующем порядке: ^{134,137}Cs, ⁹⁰Sr, ^{239,240}Pu.



Рис. 3. Динамика изменения объемной активности ¹³⁷Cs в местах возможного нахождения населения на расстоянии 1—10 км от источника выброса 1 Бк

Fig. 3. Dynamics of changes in the volumetric activity of 137 Cs in places where the population may be located at a distance of 1-10 km from the source of a 1 Bq release

Таблица 1. Плотность выпадения техногенных радионуклидов на территории и акватории Обской губы в 1—5 км от места аварии в зависимости от индивидуальных мощностей их выброса и зоны обеспечения безопасности населения по ¹³⁷Cs, Бк/м²

Table 1. Fallout density of industrial radionuclides in the territory and water area of the Gulf of Ob 1—5 km from the accident site depending on their individual release rate, the population safety zone ¹³⁷ Cs, Bq/m ²								
	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	131	⁹⁰ Sr	^{239,240} Pu	Допустимость		

R, км	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	131	⁹⁰ Sr	^{239,240} Pu	Допустимость проживание по загрязнению ¹³⁷ Cs	
	1,1∙10¹6 Бк	1,0∙10¹ Бк	3,6∙10¹⁵Бк	9,0∙10¹⁵Бк	1,8∙10¹⁴Бк		
0—1	(5,5—9,5)·10 ⁷	(1,2—2,1)·10 ⁸	(2,1-2,8).107	(4,4—7,7)·10 ⁷	(0,9—1,6)·10 ⁶	Отчуждение	
1—2	(0,3—1,9)·10 ⁶	(0,5—1,4)·10 ⁶	(0,7-1,2).105	(2,0—5,6)·10⁵	(0,4—1,1) ·10 ⁴	Полное отселение	
2—3	(0,9—2,4)·10 ⁵	(0,9—4,0)·10 ⁵	(2,0-6,9).104	(0,9—1,9)·10⁵	(1,2—3,8)·10 ³	С правом отселения	
3—5	(2,2—8,8)·10 ⁴	(3,7—8,3)·10 ⁴	(0,6—1,9)·104	(1,8—7,2)·10 ⁴	(0,4—1,1)·10 ³	Льготное	
Фон *	В фоне нет	(4—6) ·10 ³	В фоне нет	(2—8)·10 ²	(0,2—3,5)·10 ²	Не ограничено	

* Плотность выпадения ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ^{239,240}Pu в окружающей среде [18; 19].

Для рассматриваемых условий при наибольшем выбросе ¹³⁷Cs 10¹⁷ Бк дозовая нагрузка за 3—10 мин при контакте человека с загрязненным воздухом может достигать 6—25 Зв, что во много раз превысит допустимую годовую норму в 0,001 Зв для населения (табл. 2).

В зависимости от последующего направления перемещения радиоактивного облака за пределы порта Сабетта дозовая нагрузка на население в результате загрязнения территории при наибольшем выбросе 10¹⁷ Бк ¹³⁷Сs в течение первых 10 сут может достигнуть 0,01—0,1 Зв, что превысит годовой предел 0,001 Зв. Соответственно потребуется принятие экстренных мер по обеспечению безопасности населения, включая его эвакуацию (рис. 4).

Прогноз загрязнения до 1000 км. На этом этапе были получены данные, позволяющие провести сравнительный анализ загрязнения территорий и морских акваторий при перемещении радиоактивного облака на север и восток, для летнего периода в зависимости от мощности выброса ¹³⁷Cs в пределах 10¹³—10¹⁷ Бк, включая входящие в его состав ⁹⁰Sr, ¹³¹I, ¹³⁴Cs и ^{239,240}Pu. Результаты прогноза по ¹³⁷Cs до 1000 км формируют целостное пред-

Таблица 2. Эффективная годовая доза внутреннего и внешнего облучения в результате вдыхания и нахождения населения на загрязненной территории на удалении до 10 км от источника для определяющих радионуклидов при выбросе 1 Бк, Зв

Table 2. Effective annual dose of internal and external radiation due to inhalation and presence of the population in the contaminated area at a distance of up to 10 km from the source for the determining radionuclides with a release of 1 Bq, Sv

	Доза облучения на 1 Бк выброса, Зв							
L, км	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		¹³¹ *	⁹⁰ Sr *	^{239,240} Pu *	
	внешняя	внутренняя	внешняя	внутренняя	внутренняя	внутренняя	внутренняя	
1	4,1·10 ⁻¹⁷	3,10·10 ⁻¹⁹	1,8·10 ⁻¹⁷	2,1·10 ⁻¹⁹	3,5·10 ⁻¹⁹	1,7·10 ⁻¹⁸	2,4·10 ⁻¹⁵	
2	1,2·10 ⁻¹⁶	9,00·10 ⁻¹⁹	5,3·10 ⁻¹⁷	6,5·10 ⁻¹⁹	1,0·10 ⁻¹⁸	5,1·10 ⁻¹⁸	7,0·10 ⁻¹⁵	
3	1,7·10 ⁻¹⁶	1,20·10 ⁻¹⁸	7,3·10 ⁻¹⁷	8,8·10 ⁻¹⁹	1,4·10 ⁻¹⁸	6,9·10 ⁻¹⁸	9,6·10 ⁻¹⁵	
4	1,2·10 ⁻¹⁶	8,00·10 ⁻¹⁹	4,9·10 ⁻¹⁷	6,0·10 ⁻¹⁹	9,7·10 ⁻¹⁹	4,7·10 ⁻¹⁸	6,5·10 ⁻¹⁵	
5	1,1·10 ⁻¹⁶	8,00·10 ⁻¹⁹	4,8.10-17	5,8·10 ⁻¹⁹	9,4·10 ⁻¹⁹	4,6·10 ⁻¹⁸	6,3·10 ⁻¹⁵	
6	9,3·10 ⁻¹⁷	6,90·10 ⁻¹⁹	4,0·10 ⁻¹⁷	4,9·10 ⁻¹⁹	7,8·10 ⁻¹⁹	3,8·10 ⁻¹⁸	5,3·10 ⁻¹⁵	
7	7,7·10 ⁻¹⁷	5,80·10 ⁻¹⁹	3,3·10 ⁻¹⁷	4,0·10 ⁻¹⁹	6,5·10 ⁻¹⁹	3,2·10 ⁻¹⁸	4,4·10 ⁻¹⁵	
8	7,6·10 ⁻¹⁷	5,70·10 ⁻¹⁹	3,2·10 ⁻¹⁷	4,0·10 ⁻¹⁹	6,3·10 ⁻¹⁹	3,1·10 ⁻¹⁸	4,3·10 ⁻¹⁵	
9	6,6·10 ⁻¹⁷	4,90·10 ⁻¹⁹	2,8.10-17	3,4·10 ⁻¹⁹	5,5·10 ⁻¹⁹	2,7.10-18	3,7·10 ⁻¹⁵	
10	5,5·10 ⁻¹⁷	4,10·10 ⁻¹⁹	2,4.10-17	2,9·10 ⁻¹⁹	4,6·10 ⁻¹⁹	2,3·10 ⁻¹⁸	3,1·10 ⁻¹⁵	

* Внешнее облучение не оценивали ввиду кратковременного воздействия по сравнению с внутренним (β-, α-излучатели).



Рис. 4. Доза внешнего облучения за 1 (*a*), 10 (*b*) и 365 (*в*) сут после аварии в порту Сабетта с выбросом 10¹⁷ Бк ¹³⁷Сs и образованием радиоактивного следа в северном и восточном направлениях

Fig. 4. External radiation dose for 1 (*a*), 10 (*6*) and 365 (*b*) days after the accident in the port of Sabetta with the release of 10¹⁷ Bq ¹³⁷Cs and the formation of a radioactive trace in the northern and eastern directions



Рис. 5. Плотность выпадения ¹³⁷Cs летом в северном направлении (*a*) от максимального гипотетического выброса 10¹⁷ Бк на протяжении 750 км при пересечении радиоактивным облаком восточной части Карского моря и двух ветвей Северного морского пути. Изменение МЭД (*b*) на следе до 250 км от порта Сабетта

Fig. 5. Density of ¹³⁷Cs fallout in summer time in the northern direction (*a*) caused by the maximal hypothetical release of 10^{17} Bq over a distance of 750 km in the event of radioactive cloud crossing the eastern part of the Kara Sea and two branches of the Northern Sea Route. The EDR change (*b*) along the trace up to 250 km from the port of Sabetta

ставление о загрязнении территорий и морских акваторий вплоть до природного радиоактивного фона. Одновременно прогноз до 250 км использовали для выделения опасных зон загрязнения по плотности выпадения ¹³⁷Cs, МЭД и дозовым нагрузкам для населения (рис. 5).

Из данных, приведенных на рис. 5, следует, что максимальная гипотетическая авария с выбросом 10¹⁷ Бк ¹³⁷Cs приведет к общему радиоактивному загрязнению территорий и морских акваторий до уровня фона на протяжении 750—800 км. Недопустимые загрязнения поверхности (555—1480 кБк/м²) и МЭД (до 10 мкЗв/ч) будут наблюдаться до 150—200 км. Однако они не затронут СМП, южная ветвь которого отстоит от порта Сабетта на 300—400 км.

В то же время в случае прохождения радиоактивного следа по полуострову Ямал и прилегающим островам на удалении 200—250 км плотность загрязнения может достигнуть критерия, по которому потребуется проживание населения только под медицинским контролем и при льготных условиях. Ближе до 100—150 км возникнет необходимость отселения или предоставления права на отселение, а в 20—30 км от места аварии — создания зон отчуждения.

Из данных, приведенных в табл. 1 и 2, следует, что после аварии плотность выпадения и дозы при загрязнении ^{134,137}Cs будут превалировать над остальными радионуклидами. Однако через 1,5—2 года в результате частичного распада ^{134}Cs МЭД будет определяться γ -излучением ^{137}Cs , а β -, α -загрязнение — ^{90}Sr и $^{239,240}Pu$.

Прогноз формирования дозовых нагрузок по ¹³⁷Cs на радиоактивном следе показал, что они будут в 2—3 раза выше для взрослых по сравнению с детьми и могут достигать 0,001—1 Зв. В восточном направлении в связи с более интенсивным рассеянием радиоактивных веществ они окажутся на один-два порядка меньше, но в аномальных зонах даже вдали от источника до 30—40 км могут быть на порядок больше (рис. 6).

Из данных, приведенных на рис. 6, следует одна из отличительных особенностей радиоактивного загрязнения поверхностей и соответственно дозовых нагрузок при низком перемещении радиоактивного облака в северном и восточном направлениях. В первом случае из-за прохождения радиоактивного облака преимущественно над однородной морской поверхностью и частично в береговой полосе картина загрязнения приближается к классическому радиоактивному загрязнению с осесимметричным распределением доз. Во втором случае после пересечения водной поверхности выделяются отдельные зоны с уровнями 0,01—0,1 Зв/год и 0,1— 1,0 Зв/год, которые обусловлены ландшафтом (возвышенностями).



Взрослые Дети Рис. 6. Ожидаемая годовая доза облучения взрослых и детей при возникновении гипотетической аварии с выбросом 10¹⁷ Бк ¹³⁷Сs в порту Сабетта и образовании радиоактивного следа в северном и восточном направлениях Fig. 6. Expected annual radiation dose for adults and children in the event of a

hypothetical accident with a release of 10^{17} Bq 137 Cs in the port of Sabetta and the formation of a radioactive trace in the northern and eastern directions

Заключение

Не все плавучие объекты с ЯЭУ ФГУП «Атомфлот» представляют высокую потенциальную угрозу, включая опасность для населения и окружающей среды. Гипотетические аварии лихтеровоза «Севморпуть», ПАТЭС, АСММ типа Шельф, АБВ-6М (Э) с возможными выбросами ¹³⁷Сs в пределах (1— 5)·10¹³ Бк не приведут к отчуждению территорий за 1 км СЗЗ и полному отселению жителей в 5 км ЗН при переносе радиоактивных веществ в северном направлении вдоль Обской губы относительно порта Сабетта. При перемещении радиоактивных веществ на восток произойдет радиоактивное загрязнение, которое потребует полного или частичного отселения в ЗН только из области следа. Авария не будет представлять опасности и для терминала СПГ в связи с отделением его от порта Сабетта водной преградой 40—50 км в виде Обской губы.

Для объектов с потенциальным выбросом 10¹⁴— 10¹⁵ Бк, возможным для РУ ледоколов «Ямал», «50 лет Победы», «Вайгач», «Таймыр», головной «Лидер», радиоактивные вещества с недопустимой плотностью выпадения и МЭД выйдут за пределы 1 км С33 до 2—3 км и останутся в 5-километровой зоне наблюдения, создавая угрозу и опасность только на радиоактивном следе.

Авария офшорного ледокола с РУ РИТМ-200Б (10¹⁶ Бк) тепловой мошностью 209 МВт потенциально приближается к последствиям радиоактивного загрязнения для гипотетической аварии на РУ РИТМ-400 (10¹⁷ Бк). В случае возникновения ядерной аварии и распространения радиоактивных веществ в атмосфере в летний период в северном и восточном направлениях сформируется загрязнение до 200—250 км на территориях полуострова Ямал и Гыданского полуострова, акваториях Обской губы и Карского моря. Высокой опасности подвергнется порт Сабетта и его 5-километровая зона наблюдения. На радиоактивном следе до 20-30 км сформируются области отчуждения и отселения, в 100—150 км — с правом на отселение, в 150-200 км еще будет позволительно проживание населения, но под радиационным и медицинским контролем, область в 200—250 км потребует социально-экономического льготного статуса.

Загрязнение Карского моря воздушным путем и поступление в него радиоактивной воды

из Обской губы не окажут значимого влияния на функционирование Северного морского пути, проходящего на удалении 300—400 км относительно порта Сабетта.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00615П).

Литература/References

1. Наумов В. А., Гусак С. А. Накопление гамма-излучающих радионуклидов ¹³⁴Cs, ¹⁵⁴Eu в реакторах атомных станций малой мощности // Вестн. Кольского науч. центра РАН. — 2019. — № 4. — С. 40—49. *Naumov V. A., Gusak S. A.* Accumulation of gammaemitting radionuclides ¹³⁴Cs, ¹⁵⁴Eu in reactors of lowpower nuclear power plants. Bull. of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2019, no. 4, pp. 40—49. (In Russian).

2. Авария на АЭС «Фукусима-Дайити»: Доклад генерального директора МАГАТЭ. — Вена, 2015. — 264 с. The accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant. Report by the Director General of the IAEA. Austria, Vienna, 2015, 264 p. (In Russian).

3. Саркисов А. А., Антипов С. В., Высоцкий В. Л. и др. Радиационные и радиологические последствия ги-

потетической ядерной аварии на атомном объекте в районе расположения ФГУП «Атомфлот» // Атом. энергия. — 2022. — Т. 133, вып. 4. — С. 229 — 238. (In Russian).

Sarkisov A. A., Antipov S. V., Vysotsky V. L. et al. Radiation and Radiological Consequences of a Hypothetical Nuclear Accident at a Nuclear Facility Located in the Positional-Home District of Atomflot. Atomic Energy, 2022, vol. 133, iss. 4, pp. 229—238. (In Russian).

4. Чернобыль: оглядываясь назад, чтобы идти вперед: Конференция в Вене / Перев. с англ. — Вена: МАГАТЭ, 2005.

Chernobyl: Looking Back to Go Forward. Proc. Int. Conf. Vienna, IAEA, 2005.

5. Бюсселер К., Аояма М., Фукасава М. Воздействие АЭС «Фукусима» на радиоактивность морской среды // Экология и технологии. — 2011. — 45, 23. — С. 9931—9935.

Buesseler K., Aoyama M., Fukasawa M. Impacts of the Fukushima nuclear power plants on marine radioactivity. Environ. Sci. Technol., 2011, 45, 23, pp. 9931— 9935. (In Russian).

6. Арутюнян Р. В., Припачкин Д. А., Сороковикова О. С. и др. Система ПАРРАД и ее испытания на реальных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу // Атом. энергия. — 2016. — Т. 121, вып. 3. — С. 169—173.

Arutyunyan R. V., Pripachkin D. A., Sorokovikova O. S. et al. The PARRAD system and its tests on real releases of radioactive substances into the atmosphere. Atomic Energy, 2016, vol. 121, iss. 3, pp. 169—173. (In Russian).

7. Скамарок У., Клемп Дж., Дудхиа Дж. и др. Описание перспективных исследований программы WRF. Версия 3. — Колорадо: NCAR, 2008, 520 с.

Skamarock W., Klemp J., Dudhia J. et al. Description of the Advanced Research WRF. Version 3. Colorado, NCAR, 2008, 520 p. (In Russian).

8. Анализ моделей GFS и рекомендации. — URL: https://mag.ncep.noaa.gov.

GFS: Model Analyses and Guidance. Available at: https://mag.ncep.noaa.gov.

9. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. — М.: Минздрав России, 2009. — 115 с.

Radiation safety standards NRB-99/2009. Sanitary rules and regulations SanPiN 2.6.1.2523-09. Moscow, Ministry of Health of Russia, 2009, 115 p. (In Russian). 10. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. СП 2.6.1.1292—2003. — Эколог. вестн. России. — 2005. — № 5. — 60 с.

Hygienic requirements for limiting exposure of the population due to natural sources of ionizing radiation. SP 2.6.1.1292—2003. Ecological Bull. of Russia, 2005, no. 5, 60 p. (In Russian).

11. Закон Российской Федерации «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию ра-

диации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» от 15 мая 1991 г. № 1244-1 (ред. от 6 декабря 2021 г. с изменениями от 23 декабря 2021 г.).

The Law of the Russian Federation "On Social Protection of Citizens Exposed to Radiation as a Result of the Chernobyl accident" dated 05.15.1991 no. 1244-1 (version of 12.06.2021 as amended dated December 23, 2021). (In Russian).

12. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (Тех. док. МПА-98) / Минатом России. — М., 1998. — 126 с.

Methodological guidelines for calculating the radiation situation in the environment and the expected exposure of the population during short-term releases of radioactive substances into the atmosphere (Tec. doc. MPA-98). The Ministry of Atomic Energy of Russia. Moscow, 1998, 126 p. (In Russian).

13. Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла: Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. — М.: НТЦ ЯРБ, 2017. — 40 с.

Recommended methods for assessing and predicting the radiation consequences of accidents at nuclear fuel cycle facilities. Safety Guidelines for the use of atomic energy. Moscow, SEC NRS, 2017, 40 p. (In Russian).

14. Корсакиссок И., Матье А., Дидье Д. Распределение в атмосфере и выпадения на поверхность земли, вызванные аварией на атомной электростанции Фукусима: моделирование в локальной области и исследование чувствительности // Атмосфер. среда. — 2013. — № 70. — С. 267—279.

Korsakissok I., Mathieu A., Didier D. Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A local-scale simulation and sensitivity study. Atmospheric Environment, 2013, no. 70, pp. 267—279. (In Russian).

15. Припачкин Д. А., Высоцкий В. Л., Будыка А. К. Влияние условий моделирования на оценку скорости сухого осаждения аэрозолей на сильно неоднородные подстилающие поверхности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2024. — Т. 60, № 2, — С. 150—157.

Pripachkin D. A., Vysotsky V. L., Budyka A. K. Influence of modeling conditions on the estimation of the dry deposition velocity of aerosols on highly inhomogeneous surfaces. News of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 150—157. (In Russian).

16. Припачкин Д. А., Высоцкий В. Л., Рубинштейн К. Г. и др. Моделирование сухого осаждения аэрозольных частиц в условиях неоднородности подстилающей поверхности для арктических районов Крайнего Севера // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2025. — Т. 62, № 4. — С. 10—16.

Pripachkin D. A., Vysotsky V. L., Rubinstein K. G. et al. Modeling of dry deposition of aerosol particles in the conditions of heterogeneity of the underlying surface for the Far North Arctic regions. News of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics, 2025, vol. 62, no. 4, pp. 10—16. (In Russian).

17. Саркисов А., Высоцкий В., Припачкин Д. и др. Условия и исходные данные для восстановления радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на население вследствие ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма // Атом. энергия. — 2019. — Т. 127. — № 2. — С. 105—111.

Sarkisov A., Vysotsky V., Pripachkin D. et al. Conditions and Initial Data for Reconstructing the Environmental Radioactive Contamination and Population Dose Loads Resulting from a Nuclear Accident on a Nuclear Submarine in Bukhta Chazhma. Atomic energy, 2019, vol. 127, no. 2, pp. 105—111. (In Russian). 18. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси / Под ред. Ю. А. Израэля и И. М. Богдевича. — Москва; Минск: Фонд «Инфосфера»-НИА-Природа, 2009. — 140 с.

Atlas of modern and forecast aspects of the consequences of the Chernobyl accident in the affected territories of Russia and Belarus). Ed. by Yu. A. Israel and I. M. Bogdevich. Moscow; Minsk, Infosphere Foundation-NIA-Priroda, 2009, 140 p. (In Russian).

19. Лукашенко С. Н., Эдомская М. А. Плутоний в окружающей среде. Источники, механизмы распространения, концентрации // Радиац. биология. Радиоэкология. — 2021. — Т. 61, № 4. — С. 394—424.

Lukashenko S. N., Edomskaya M. A. Plutonium in the environment. Sources, distribution mechanisms, and concentrations. Radiation biology. Radioecology, 2021, vol. 61, no. 4, pp. 394—424. (In Russian).

Информация об авторах

Антипов Сергей Викторович, доктор технических наук, заведующий отделом, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: santipov@ ibrae.ac.ru.

Высоцкий Валентин Леонидович, доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: vvl@ ibrae.ac.ru.

Припачкин Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: dmrwer@mail.ru.

Рубинштейн Константин Григорьевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: rubinstein@ibrae.ac.ru.

Игнатов Роман Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: ignatov@mail.ru.

Губенко Инна Михайловна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: gubenko@mail.ru.

Хохлов Игорь Николаевич, ведущий инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: hin@ibrae.ac.ru.

RADIATION AND RADIOLOGICAL CONSEQUENCES OF A HYPOTHETICAL NUCLEAR ACCIDENT IN THE PORT OF SABETTA ON THE FSUE "ATOMFLOT" FLOATING NUCLEAR OBJECTS

Antipov, S. V., Vysotsky, V. L., Pripachkin, D. A., Rubinstein, K. G., Ignatov, R. Yu., Gubenko, I. M., Khokhlov, I. N.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow Russian Federation)

The article was received on 27 November 2024

For citing

Antipov S. V., Vysotsky V. L., Pripachkin D. A., Rubinstein K. G., Ignatov R. Yu., Gubenko I. M., Khokhlov I. N. Radiation and radiological consequences of hypothetical nuclear accidents in the port of Sabetta on the FSUE Atomflot floating nuclear objects. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 215—225. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-215-225. (In Russian).

Abstract

In order to enhance the safety of the population and the environment, the paper presents the results of modeling and forecast of the dispersion of industrial radionuclides in the ground atmospheric layer after a hypothetical nuclear accident on the FSUE "Atomflot" floating objects with nuclear power installations when they enter and stay in the port of Sabetta. The threats and potential hazards that various types of vessels with nuclear power installations may impose for the environment and population of the region are assessed by comparing the obtained numerical estimates with the permissible levels of radioactive contamination of the environment for human habitation.

Key words: hypothetical nuclear accident, nuclear power plant, industrial radionuclides, density of radioactive contamination, dose load.

Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation grant (project no. 20-19-00615P).

Information about the authors

Antipov, Sergey Viktorovich, Doctor of Engineering Sciences, Head of Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Russia, Moscow, Bolshaya Tulskaya St., 52), e-mail: santipov@ibrae.ac.ru.

Vysotsky, Valentin Leonidovich, Doctor of Engineering Sciences, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Russia, Moscow, Bolshaya Tulskaya St., 52), e-mail: vvl@ ibrae.ac.ru.

Pripachkin, Dmitry Aleksandrovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Russia, Moscow, Bolshaya Tulskaya St., 52), e-mail: dmrwer@mail.ru.

Rubinshtein, Konstantin Grigorievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Russia, Moscow, Bolshaya Tulskaya St., 52), e-mail: rubinstein@ibrae.ac.ru.

Ignatov, Roman Yurievich, PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Russia. Moscow, Bolshaya Tulskaya St., 52), e-mail: ignatov@mail.ru.

Gubenko, Inna Mikhailovna, PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Russia, Moscow, Bolshaya Tulskaya St., 52), e-mail: gubenko@mail.ru.

Khokhlov, Igor Nikolaevich, Leading Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (115191, Russia, Moscow, Bolshaya Tulskaya St., 52), e-mail: hin@ibrae.ac.ru.

© Antipov S. V., Vysotsky V. L., Pripachkin D. A., Rubinstein K. G., Ignatov R. Yu., Gubenko I. M., Khokhlov I. N., 2025